

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА И ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Современные индукционные системы для электронагрева воды позволяют одновременно с нагревом снижать солесодержание в нагреваемой воде за счет интенсификации химикотермических процессов в электромагнитном поле с получением нерастворимых порошковых продуктов из веществ, растворенных в воде. Общий анализ рабочих режимов обработки жидкости в рассматриваемых устройствах позволил выделить три одновременно протекающих взаимосвязанных процесса: 1 движение и нагрев жидкости в рабочем объеме за счет перепада давлений жидкости на входе и выходе устройства; 2 нагрев и конвективное движение жидкости при взаимодействии непосредственно с нагревающей поверхностью (нагрев в температурной области без насыщения, нагрев при объемном или поверхностном кипении с одновременным протеканием термохимических процессов.); 3 движение нагреваемой жидкости за счет объемнораспределенных электромагнитных сил, действующих локально на паропроводящую смесь в рабочем пространстве индукционных систем нагрева (электромагнитное вихревое перемешивание), с одновременной интенсификацией термохимических процессов в электромагнитном поле.

Принудительное движение жидкости за счет перепада давлений на входе и выходе нагревательного устройства определяет циркуляцию потока жидкости и интегральный теплообмен с коаксиальными цилиндрами. Основные принципы расчета и эффективность эксплуатационных характеристик индукционных нагревателей такого типа приведены в [1, 2]. Теплообмен жидкости с нагревающими цилиндрами определяется законом Ньютона и, следовательно, коэффициентом теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи в этом случае зависит от целого ряда факторов: температур теплоотдающей и тепловоспринимающей сред, формы и геометрических размеров нагревающих стенок, характера движения жидкости, физических свойств жидкости, теплопроводности, плотности, вязкости, скорости и электродинамических сил, возникающих при взаимодействии электропроводной воды с электромагнитным полем.

Взаимодействие жидкости с нагревающей поверхностью зависит от удельной плотности теплового потока при теплообмене и определяет характер движения жидкости непосредственно около поверхности нагрева (объемное или поверхностное кипение, нагрев без парообразования). Величина теплового потока, поступающего в жидкость, в свою очередь, определяется тепловыделением в короткозамкнутых витках индукционной системы нагрева и оценивается на основе решения уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепла [3]. Кинетика химикотермических процессов, протекающих в жидкости при ее нагреве, зависит от скорости нагрева и характера процессов, развивающихся в поверхностных слоях, которые могут рассматриваться как оптимизационные параметры для процессов снижения солесодержания в теплоносителе.

Неотъемлемым свойством любой индукционной системы нагрева является наличие интенсивных электромагнитных полей, которые определяют не только интен-

сивность преобразования электрической энергии в тепловую, но и магнитогидродинамические явления непосредственно в нагреваемой жидкости с преобразованием части электрической энергии в механическую и, как следствие, в электрохимическую при интенсификации химикотермических процессов. Взаимосвязи этих процессов изучены недостаточно, а исследовать их экспериментально в пространстве индукционной системы нагрева воды практически невозможно. Поэтому потребовалось разработать расчетно-экспериментальный метод оценки режимов работы индукционных систем нагрева воды с одновременным снижением ее солевого содержания.

Одновременность протекания термохимических и теплофизических взаимодействий в нагреваемой воде определяет необходимость изучения влияния на эти процессы напряженностей электромагнитного поля и электродинамических сил, возникающих в гидродинамических потоках нагреваемой воды. В качестве модельного объекта исследований будем рассматривать водопроводную воду со стандартным солевым содержанием 6...7 мг-экв/кг.

Направленность термохимических процессов и интенсивность их протекания можно оценить на основе анализа эксплуатационных характеристик наиболее распространенных на практике систем нагрева воды. Отопительные электроустановки, выпускаемые промышленностью, обеспечивают нагрев воды при плотностях теплового потока $(4...8) \cdot 10^{-4}$ Вт/м². Длительность безремонтного периода работы такой системы на основе трубчатых электронагревателей (ТЭН) ограничивается скоростью роста отложений (накипи) на поверхности нагревателя и при толщине отложений в 0,5 мм составляет 800...1000 часов. Электродные электродкотлы, в которых нагрев воды осуществляется за счет пропускания через воду электрического тока, сохраняют свои нагрузочные характеристики в течение 80...100 часов. Затем происходит снижение мощности из-за накопления на электродах отложений. Эти же процессы формирования отложений протекают в любой теплосети, включая системы централизованного теплоснабжения от ТЭЦ и котельных.

Химический анализ отложений показывает, что к основным составляющим относятся карбонатные соединения $(Ca, Mg, Fe) \cdot CO_3$, сульфатные $CaSO_4 \cdot 3H_2O$, оксиды железа в различных формах (гидроокиси $Fe(OH)_3$, $Fe(OH)_2$, гематиты Fe_2O_3 , вюситы FeO), шпинелиды, магнетиты Fe_2O_3 . Силикаты в отложениях встречаются как в виде безводных соединений, так и в виде гидратированных молекул.

Коррозионная агрессивность воды определяется содержанием диоксида углерода CO_2 , кислорода O_2 , сероводорода H_2S , окислов железа и ионов Cl^- и SO_4^{2-} . Химический состав воды в системах отопления может изменяться в процессе эксплуатации за счет коррозии металла труб в теплосети, взаимодействия воды с воздухом и поступлением добавочной воды. Поэтому, несмотря на расход солей в процессе накипеобразования и формирования отложений в трубах, радиаторах и на нагревателях, коррозионная способность воды самовосстанавливается, а формирование отложений происходит непрерывно. Этому способствуют реакции окисления железа с образованием бикарбоната: $Fe + 2CO_2 + 2H_2O = Fe(HCO_3)_2 + H_2$ с последующим образованием оксидов железа и вторичной двуокиси углерода: $4Fe(HCO_3)_2 + O_2 = 2Fe_2O_3 + 8CO_2 + 4H_2O$.

Проведенный анализ химико-термических процессов накипеобразования в замкнутых системах отопления показал, что особенно перспективным является создание устройства, которое бы не только обеспечивало нагрев воды, но и интенсифицировало проведение рассмотренных химических реакций до скоростей, превы-

шающих скорость восстановления коррозионных способностей воды, с получением нерастворимых соединений в объеме нагреваемой воды без осаждения продуктов реакции на каких-либо поверхностях.

Проведенные исследования показали, что такой практический результат возможно получить при реализации электронагрева в режимах нагрева в индукционных системах с движущимися слоями воды, если обеспечить необходимые критические тепловые потоки и оптимальные напряженности электромагнитного поля в областях солеобразования. Взаимодействие пароводяной смеси с электромагнитным полем, величина электродинамических сил, возникающих при этом взаимодействии, во многом определяются скоростями движения и электропроводностью этой смеси, которая зависит от интенсивности теплофизических режимов нагрева воды.

Как установлено экспериментально, для интенсификации термохимических реакций в жидкости определяющим являются не столько абсолютные значения возникающих электродинамических сил, сколько вихревой характер поля этих сил. При этом скорости движения элементарных объемов жидкости должны быть соизмеримы со скоростями протекающих химических реакций в жидкости. Обеспечивая в цилиндрической системе индукционного нагрева оптимальный угол α между направлением индукции магнитного поля \vec{B}_a и скоростью движения $\vec{V}_o = f(z, r, \varphi)$, создаются условия трехмерного характера растекания тока, составляющие которого зависят как от \vec{B}_a , так и от \vec{V}_o .

При атмосферном давлении электропроводность паровой фазы значительно ниже электропроводности водяной фазы. Поэтому пароводяную смесь можно рассматривать как систему, состоящую из двух компонент: проводящей электрический ток (воды) и диэлектрика (пара). Электропроводность такой гетерогенной системы зависит от проводимости водяной фазы, объемного паросодержания и структуры пароводяной смеси.

Паропроводная смесь и вода относятся к слабо проводящим (полупроводниковым) веществам и характеризуются ионной электропроводностью за счет диссоциации самой жидкости (собственная электропроводность) и примесей (примесная электропроводность). Удельное электрическое сопротивление воды и пароводяной смеси может изменяться в диапазоне от $5 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^5$ Ом·м в зависимости от содержания солей и пара. Экспериментально нами установлено, что локальное взаимодействие силового электродинамического поля и напряженностей электромагнитного поля на область насыщенных растворов при нагреве воды существенно увеличивает скорости образования нерастворимых в воде солей и тем самым обеспечивает снижение жесткости в индукционных системах нагрева.

Список использованных источников

1. Чередниченко В. С., Хацевский К. В. Индукционные установки для нагрева и электрофизической обработки жидкостей // Индукционный нагрев. №22. 2012. С. 47-48.
2. Хацевский К. В., Гоненко Т. В. Энергоэффективные технологии электронагрева жидкостей и газов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 176 с.
3. Хацевский К. В., Гоненко Т. В., Хацевский В. Ф. Моделирование автоматизированных электротехнологических установок нагрева жидкостей и газов. Павлодар: Изд-во Кереку, 2013. 165 с.